doi:10.13866/j.azr.2018.05.29

巨菌草留茬沙障防风固沙效益及其适宜模式研究①

王 强, 左合君, 李钢铁, 郭婧宇, 魏翔宏, 刘宇胜, 闫 敏
(内蒙古农业大学沙漠治理学院/内蒙古风沙物理与防沙治沙工程重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010011)

摘 要: 基于对乌兰布和沙漠刘拐沙头黄河沿岸相近株距(10~15 cm)、不同行距(1 m、2 m)、不同留茬高度(10 cm、30 cm)巨菌草的防风阻沙试验的观测数据分析。结果表明:① 巨菌草留茬沙障的防风固沙效益与沙障的高度和行距有直接关系,高度一定,行数越多,带距越小,防护效果越好,但所需材料增加。② 巨菌草留茬沙障内输沙量主要集中在地表 15 cm 以下,近地表 0~5 cm 处沙障对风沙流的阻碍能力较强。沙障行距为 1 m、2 m 时,高 10 cm 的沙障分别经 9 带、12 带后风速降至起沙风速以下;高 30 cm 的沙障对风的阻碍能力增强,分别经 7 带、9 带后地表无流沙运动。③ 沙障的设置应在保证高效的前提下降低成本。行距 2 m、高 30 cm 的巨菌草留茬沙障,气流经过 9 个条带(18 m 宽)后,风速可降至起沙风速以下,此设置模式宜在干旱地区推广。

关键词: 巨菌草留茬沙障; 风速; 风沙流结构; 防风效能; 输沙量; 乌兰布和沙漠

沙障是固定流沙的主要措施之一,各类沙障受材料、成本的限制,使沙障的生态效益与经济效益未达到最优[1-4]。常规沙障材料中,高度较低的沙柳沙障易被沙埋,防护作用降低;高度较高时沙障易被风吹倒,且成本增加[4-5]。砾石及黏土沙障虽有防风固沙效益,在沙源丰富地区因材料稀少一般不被使用;戈壁地区地表能被风吹起的沙物质不多,其防护效益不明显,且寿命较短[6-7]。近些年,研究人员采用一些新材料进行防沙治沙工作[7-9],如尼龙网沙障、HDPE 防沙网、塑料网格沙障,此类沙障设置成本较高,易沙埋、掏蚀。

巨菌草(*Pennisetum giganteum*),禾本科,狼尾草属,原产于非洲,适宜在热带、亚热带和温带生长及栽培,是一种高产优质牧草。1983 年由国家菌草工程技术研究中心从南非引进[10]。巨菌草可在干旱贫瘠沙地生长,但其抗低温能力较差,半致死温度为 0.69 ℃[11-12]。2013 年,在乌兰布和沙漠进行巨菌草的引种试验,试验区为直接在流沙上种植,其地上生物量可达 130.95 $t \cdot hm^{-2}$,为青储玉米的 4.9 倍,而耗水量比青储玉米少 1 200 $L \cdot hm^{-2}$[13]。秋季对巨菌草进行收割处理,将地表留茬作为沙障,观测其防风阻沙作用。巨菌草留茬沙障与常规沙障材料相比,材料环保、无沙障设置成本,经济价值较高。本文主要对不同高度、不同行距巨菌草留茬沙障的防风固沙效果进行试验观测,定量评价其防护效益,为巨菌草留茬沙障的推广提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于巴彦淖尔市磴口县刘拐沙头,属于乌兰布和沙漠东北缘,地理坐标 40°9′58.79″N,106°9′58.79″E,海拔 1 045~1 053 m。主害风向为西北风,年均风速 4.1 $m \cdot s^{-1}$,风季最大风速为 15.3 $m \cdot s^{-1}$,平均风速为 6.76 $m \cdot s^{-1}$,全年大风日数为 85 d。土壤多为风沙土,天然分布植物多为白刺(*Nitraria tangutorum*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)等旱生植物,并有猫头刺(*Oxytropis aciphylla.*)、柽柳(*Tamarix chinensis*)、盐爪爪(*Kalidium foliatum*)等植物伴生。

1.2 研究方法

1.2.1 沙障布设 2016 年在巨菌草种植样地,将秋收后的留茬视为沙障,高度分别为 10 cm、30 cm,行距分别为 1 m 和 2 m,株距 10~15 cm(图 1)。为了更好地防风固沙,巨菌草种植垄的方向为南北走向。

① **收稿日期:** 2018-01-22; **修订日期:** 2018-04-04
基金项目: 国家林业局公益性行业科研专项(201504412)资助
作者简介: 王强(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向为荒漠化防治. E-mail:wuzhiwq@163.com
通讯作者: 左合君. E-mail:zuohj@126.com

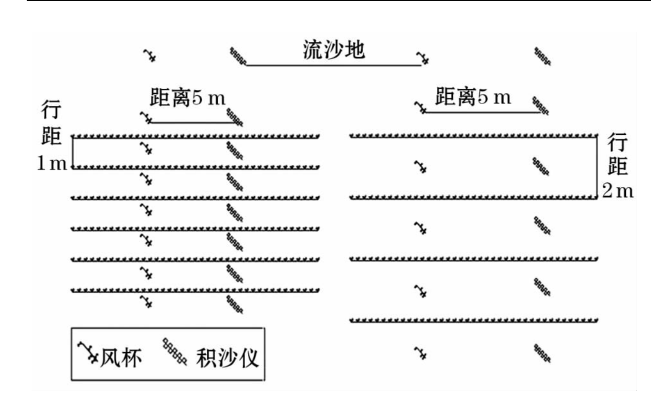


图1 样地及风杯、积沙仪布设示意图

Fig. 1 Distribution of the sampling plots, wind-cups and sand traps

1.2.2 指标测定 2017年4月，采用HOBO小型风速风向观测仪对巨菌草沙障内的风速进行观测，量程为0～45 m·s^{-1}，精度为±1.1 m·s^{-1}或4%读数。风速测点分别位于裸沙地、沙障前及沙障内部。每一测点设置高度分别为10 cm、20 cm、30 cm、50 cm、100 cm、200 cm，每个高度布设1个风杯，每2 s自动记录1次数据，观测时间为20 min，所测风速为瞬时风速。风杯位置如图1所示。

巨菌草留茬沙障的防风效能根据公式计算得出：

$$E_{X,Z}=\frac{V_{0,Z}-V_{X,Z}}{V_{0,Z}}\times 100\% \quad (1)$$

式中：$V_{X,Z}$为沙障X、高度为Z处的平均风速；$V_{0,Z}$为旷野高度Z处的平均风速；$E_{X,Z}$为沙障带X、高度为Z处的防风效能。

在测量风速的同时，多次重复观测风沙流。积沙仪与风杯平行放置，间距为5 m（图2）。积沙仪高50 cm，从底部到顶部每5 cm高度设置1个积沙盒，共10个积沙盒，积沙口敞开，积沙仪尾端放有积沙布袋。根据观测风速大小确定积沙观测时间，分别记录积沙观测的开始和停止时间，并在积沙袋上标号记录称重。

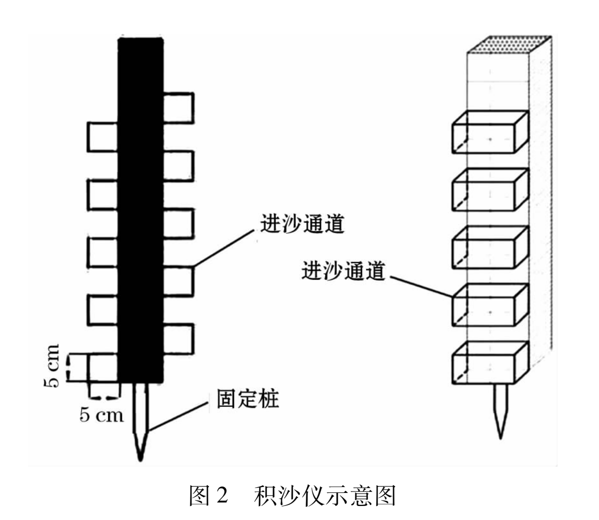


图2 积沙仪示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sand trap

2 结果分析

2.1 巨菌草沙障对风速的影响

根据野外实测数据，分析6.55 m·s^{-1}、8.81 m·s^{-1}、10.32 m·s^{-1} 3种旷野风速下低立式巨菌草留茬沙障近地表20 cm处的风速变化情况。

由图3可知，沙障行距1 m时，第1带高10 cm的巨菌草留茬沙障后，沙障内3种旷野风速梯度下风速略有降低，此时沙障防风效能为7.74%、4.97%和2.38%。沙障对风速的降低具有累加性，沙障内风速持续降低。旷野风速为6.55 m·s^{-1}时，经过第6带高10 cm的沙障，近地表20 cm处风速降低至2.24 m·s^{-1}，小于起沙风速2.26 m·s^{-1}（2 m处风速5 m·s^{-1}）[14]，防风效能达到53.14%；沙障对旷野风速8.81 m·s^{-1}、10.32 m·s^{-1}的降低幅度相似。对实测数据拟合得出：分别经过8带、9带高10 cm的巨菌草留茬沙障风速降至起沙风速以下，拟合方程R^2>0.99（不同行距、高度的巨菌草留茬沙障防风效能曲线进行线性拟合，得出R^2值），说明拟合趋势线>99.99%涵盖了实测数据，且具有共性，可以作为标准工作曲线用于未知数据的计算[15]。高30 cm的巨菌草留茬沙障对风速的降低幅度大于高10 cm的沙障，分别经过4带、6带、7带高30 cm的沙障后，地表20 cm处风速降至起沙风速以下，地表无流沙运动。在3种旷野风速梯度下7带高30 cm巨菌草留茬沙障后，防风效能达到69.04%、67.22%和62.38%。

行距2 m时，第1带高10 cm的巨菌草留茬沙障防风效能为行距1 m时沙障的0.46、0.86倍和0.87倍，沙障对风速的削弱能力降低，行距2 m、高10 cm的沙障分别经过9带、11带、12带，沙障内风速降至起沙风速以下。高30 cm沙障经过第1带防风效能是行距2 m、高10 cm沙障的1.96、1.27倍和2.24倍，表明无论沙障行距大小，随着沙障高度的增加，对风的降低幅度增大。通过对实测数据拟合得出：行距2 m、高30 cm的沙障分别经过8带、9带，沙障内风速降至起沙风速以下。

可见，行距1 m、高30 cm的沙障防风效能>行

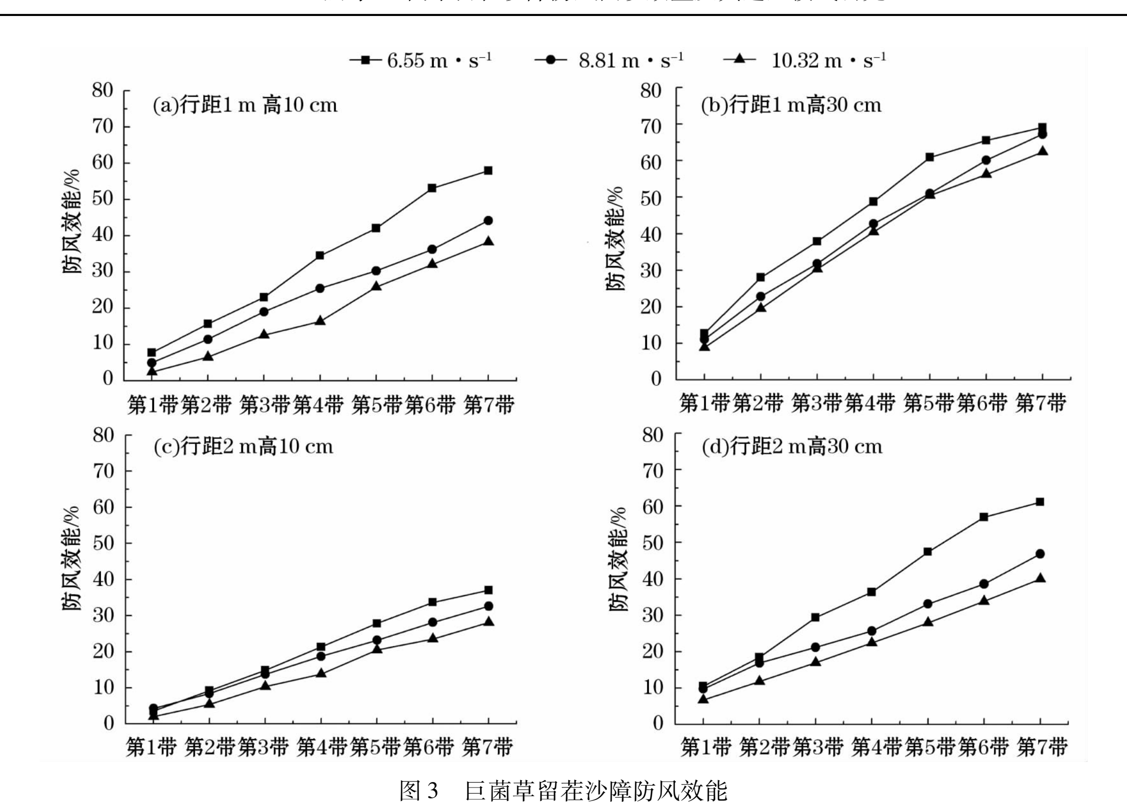


图 3　巨菌草留茬沙障防风效能

Fig. 3　Effect of Pennisetum giganteum sand-barriers on wind speed

距 2 m、高 30 cm 的沙障防风效能 > 行距 1 m、高 10 cm 的沙障防风效能 > 行距 2 m、高 10 cm 的沙障防风效能。

2.2　巨菌草沙障对风沙流的影响

为研究巨菌草沙障对风沙运动的影响,对不同高度、行距的巨菌草沙障内部风沙流进行多次重复观测。对实测数据进行筛选,分别筛选出 6.22 m·s^{-1}、8.21 m·s^{-1}附近的 9 次风速,对其测量结果取平均值,结果如图 4 和图 5 所示。

由图 4 可知,旷野风速相同时,裸沙地输沙量近似相等。沙障内输沙量主要集中在近地表 30 cm 以下,观测高度内,积沙仪各层的含沙量随着距沙面高度的增加而减少。

沙障对风沙流起到阻碍作用,经过沙障时,风沙流中的沙物质含量降低。旷野风速 6.22 m·s^{-1}时,裸沙地总输沙量为 83.3 g,高 10 cm 的巨菌草沙障各沙障带输沙量均小于裸沙地,仅为裸沙地的 0.60、0.42、0.24 倍和 0.16 倍。经 4 带沙障后,沙障内输沙量为 13.7 g,流沙趋于稳定。通过拟合分析得出,6 带沙障后,沙障内无流沙,流沙固定。随着沙障高度的升高,对风沙流的阻碍能力增强,高 30 cm 的巨菌草留茬沙障,各带输沙量分别为 35 g、8.9 g、4.6 g、0。4 带高 30 cm 的沙障后,沙障内流沙固定。

风速升高,风沙活动增强,地表输沙量增大,旷野风速增大到 8.21 m·s^{-1}时,裸沙地输沙量为 226.7 g,是风速 6.22 m·s^{-1}时输沙量的 2.74 倍。沙障内部输沙量增加,需要延长沙障带才能使风速降低,流沙固定。旷野风速 8.21 m·s^{-1}时,高 10 cm 巨菌草留茬沙障内各带输沙量是低风速 6.22 m·s^{-1}时的 1.49、1.72、1.93 倍和 1.85 倍;高 30 cm 的巨菌草沙障在风速 8.21 m·s^{-1}时,各带输沙量分别为 64.8 g、49 g、30.5 g 和 14.9 g,是高 10 cm 沙障的 0.87、0.82、0.78 倍和 0.59 倍。通过对实测数据拟合得出,高 10 cm、30 cm 的巨菌草沙障分别经过 8 带、6 带后,风速才能降至起沙风速以下,沙障内无流沙。

由图 5 可知,沙障行距增大到 2 m 时,沙障对风沙流的削弱能力降低,旷野风速 6.22 m·s^{-1}时,高 10 cm 的巨菌草沙障内部输沙量增加到 64.2 g、42.7 g、28.6 g 和 16 g,是高 30 cm 沙障内部输沙量的 1.28、1.29、1.55 倍和 1.76 倍,高 30 cm 的巨菌草沙障 4 带后输沙量为 9.1 g,此时风速与起沙风速相似,沙障内略起流沙。

高 10 cm 的巨菌草留茬沙障在风速 8.21 m·s^{-1}时,沙障内各带输沙量分别为 106.9 g、79.9 g、54

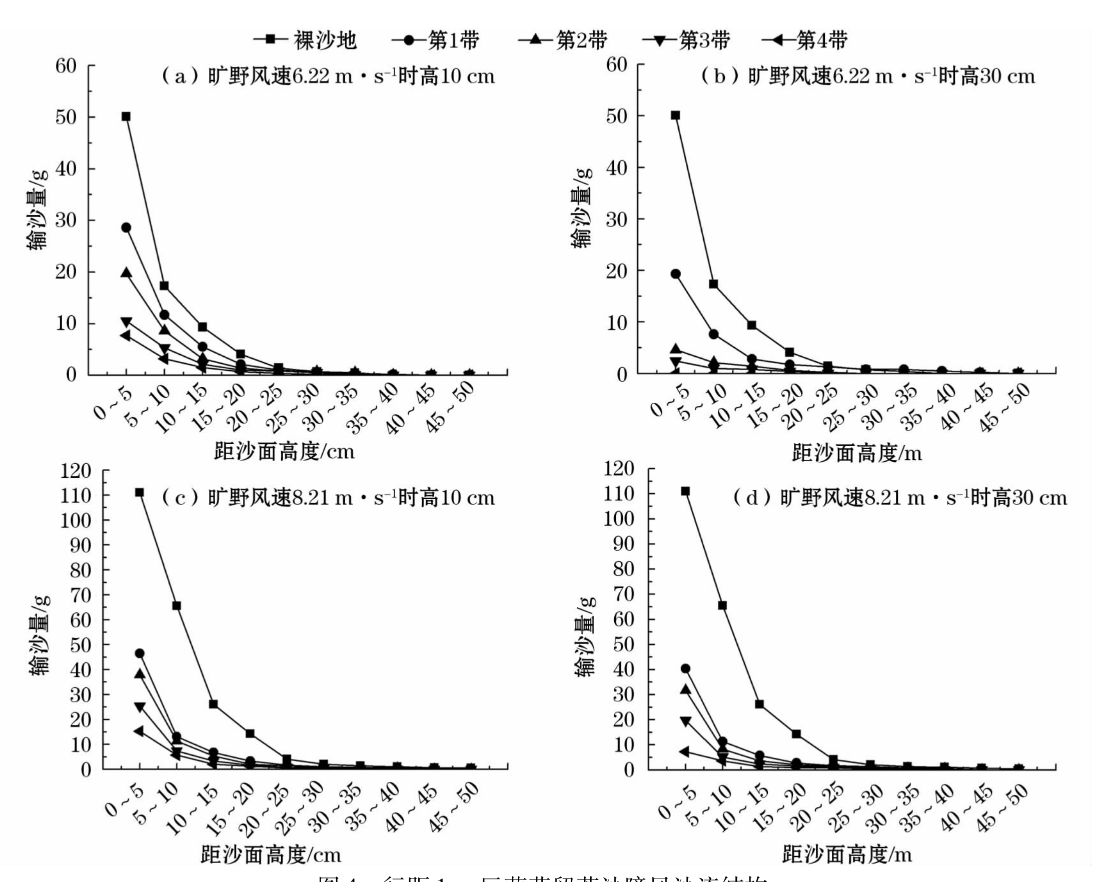


图4 行距1 m巨菌草留茬沙障风沙流结构

Fig. 4 Effect of Pennisetum giganteum sand-barriers with 1 m row spacing on sand flow structure

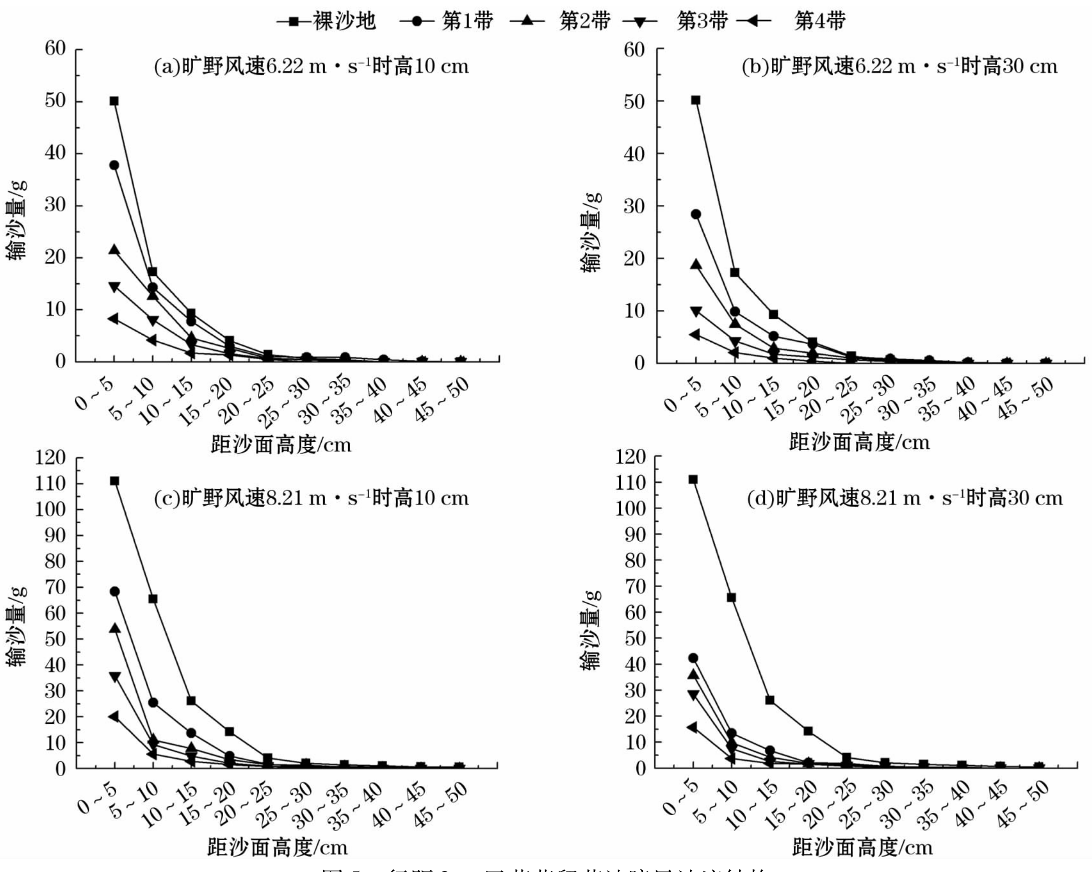


图5 行距2 m巨菌草留茬沙障风沙流结构

Fig. 5 Effect of Pennisetum giganteum sand-barriers with 2 m row spacing on sand flow structure

g 和31.1 g,是旷野风速6.22 m·s^{-1}时输沙量的1.67、1.87、1.89 倍和1.94 倍;高30 cm 的巨菌草留茬沙障在旷野风速8.21 m·s^{-1}时的各带输沙量分别为68 g、54.4 g、42.3 g 和23.9 g,是10 cm 高沙障的0.64、0.68、0.78 倍和0.77 倍。

可见,沙障内输沙量裸沙地 > 高 10 cm 巨菌草沙障 > 高 30 cm 巨菌草沙障;各带输沙量均表现为:裸沙地 > 第 1 带 > 第 2 带 > 第 3 带 > 第 4 带;不同风速时表现为:旷野风速 8.21 m·s^{-1}时输沙量 > 旷野风速 6.22 m·s^{-1}时的输沙量;不同行距时表现为:行距 2 m > 行距 1 m。

3 讨 论

3.1 巨菌草沙障对风速的影响

流沙运动过程中风是主要动力因素,风沙运动是一种贴近地表对流沙搬运的过程[9]。我国北方气候干燥,农田多以沙质土为主。秋收春耕前两次传统犁耕翻地后,破坏了土层结构,易造成风蚀沙化。而北方生态环境脆弱,冬春季节风大沙多,大风季节与农田裸露时期同步,导致强烈的农田土壤风蚀[16]。为保护农田,需要进行保护性耕作,作物留茬就是一种可行的方法。高度适宜的作物留茬能降低近地表风速,从而削弱侵蚀力,并有效防治土壤风蚀[17]。董立江[18]研究不同高度作物留茬降低风速能力时认为,当留茬带宽 1 m、高度 20 cm 时,可以有效降低耕作带内风速;当带宽为 1.5 m 及 2 m 时,留茬适宜高度应为 25 cm。本文研究区的巨菌草种植地在乌兰布和沙漠裸沙地上,秋季收割留茬发挥了沙障作用。

流动沙地设置巨菌草留茬沙障后,地表粗糙度增大,减小了风的动能,阻碍风沙运动,改变风沙流结构,从而达到保护地表的目的[19]。本文主要研究位于乌兰布和沙漠刘拐沙头,高 10 cm、30 cm 等株距(株距 10 ~ 15 cm)行带式沙障的防风固沙效益。杨文斌等[20-21]在研究低覆盖度(20% ~25%)灌丛固沙林对风速的影响时,指出行带式具有显著的阻碍和降低风速的作用(风速降低 36% ~43%);等株距模式次之,风速降低(7% ~28%)。本试验设置的巨菌草留茬沙障为等株距行带式,风速观测期间风向(风向为 SWW-WWN)与沙障夹角 <30°,测得的风速数据较为有效。高风速 10.32 m·s^{-1}时,行距 1 m 时、7 带高 10 cm 沙障后风速降至 3.89 m·s^{-1},防风效能为 38.26%,数据拟合得出,9 带沙障后风速降至起沙风速以下;7 带高 30 cm 沙障后风速降至 2.24 m·s^{-1},小于起沙风速,防风效能达到 62.38%。行距 2 m 时,7 带高 10 cm、30 cm 沙障后风速仍较高,拟合分析得出,经过 12 带、9 带沙障风速降至起沙风速以下。相同研究区内,部分学者[22-24]研究低立式沙障(高度为 15 ~25 cm)防风效益时指出,旷野风速 7 m·s^{-1}时,孔隙度 25% 的土工沙障防风效果最好,防风效能为 8.4% ~19.2%;聚乳酸纤维(PLA)沙障防风效益优于麦草沙障,平均为 28.25% ~40.39%。比较得出等株距行带式巨菌草沙障具有显著的防风效益。

3.2 巨菌草沙障对风沙流结构的影响

农田作物留茬可以改变地表形态,降低风速,减少土壤风蚀,从而达到保护地表的目的。杨阳[25]研究库布其沙漠旱作农田时指出,玉米留茬地输沙量 < 免耕地 < 翻耕地,留茬高 30 cm 玉米地内输沙量为 28.7 g;对巨菌草留茬沙障内输沙量的观测得出,4 带巨菌草留茬沙障后,行距 1 m 时,沙障内输沙量为 14.9 g;行距 2 m 时,沙障内输沙量为 23.9 g,比较得出巨菌草对风沙流的阻碍能力高于玉米。两者研究区分别位于库布其沙漠和乌兰布和沙漠,虽地理相隔较远,但当地生态环境相似,有较强的可比性。巨菌草留茬沙障,起到保护地表、降低风速的目的。

沙障是工程治沙的主要措施之一,多用于干旱地区,在沙面上设置各种形式的障碍物,其主要作用是通过改变下垫面性质,降低近地表风速和输沙能力,使风沙流中沙物质沉降,以此来控制风沙流的方向、速度、结构和蚀积状况,从而达到防风固沙的目的[26]。风沙流结构是指风沙流中的沙物质在垂直高度上的分布规律,是风与地表相互作用的结果[27]。高永、李锦荣等[4,22]的研究指出,不同规格的沙障内风沙流结构不同,风沙流中输沙量主要集中在近地表 0 ~30 cm 处,距地表 0 ~10 cm 范围内输沙量可达总输沙量的 80% 以上。本实验对每种配置的巨菌草沙障分别进行了多次重复观测,设置沙障后改变了近地表风沙流结构,地表输沙量主要集中在 0 ~15 cm 处,障内输沙量较裸沙地均有所降低。风速 8.21 m·s^{-1}时,4 带高 10 cm、30 cm 巨菌草沙障后,行距 1 m 时,输沙量为裸沙地的

11.16%、6.57%,数据拟合得出8带、6带沙障后,沙障内无流沙运动;行距2 m时,输沙量为裸沙地的19.21%、10.54%,拟合分析得出11带、8带沙障后,沙障内无流沙运动。有学者研究认为[22-24],乌兰布和沙漠设置的沙障,孔隙度为15%、25%的土工沙障固沙效果较好,为旷野输沙量的36.3%、30.0%;PLA沙障固沙效果>麦草沙障,输沙量为旷野的20%~40%。比较得出巨菌草沙障固沙效果显著。

3.3 巨菌草沙障的适宜设置模式

沙障的设置应遵循高效、成本低廉、环保的原则[28]。巨菌草沙障防风固沙效益高于常见的土工沙障、PLA沙障、麦草沙障等。沙障材料为巨菌草引种试验地秋季收割地上部分的留茬,因此,巨菌草留茬沙障是无成本的。将留茬巨菌草作为沙障,材料环保,无污染,巨菌草地上部分起防风固沙作用,地下部分可以防止表土吹蚀,根系腐烂后又能增加土壤中的营养元素,是一种低廉且防风固沙效果较高的沙障材料。

巨菌草留茬沙障的设置应保证防风固沙效益的同时,兼顾巨菌草的引种试验,以便巨菌草可以更好的在沙区推广。从上述分析可知:行距1 m、高30 cm的沙障防风固沙效益>行距2 m、高30 cm的沙障防风固沙效益>行距1 m、高10 cm的沙障防风固沙效益>行距2 m、高10 cm的沙障防风固沙效益。沙障行距1 m时,高30 cm的沙障防护效果最好,但用料较多;行距2 m、高30 cm的巨菌草留茬沙障9带后风速降至起沙风速以下。此模式耗材少,防风固沙效果在同一模式下优于常见沙障(如麦草沙障、PLA沙障、土工沙障等),适宜在干旱地区推广。

4 结 论

(1)巨菌草留茬沙障可以有效降低风速,沙障条带增加,防风效能增大,障内风速降低,沙障高度增加对风的削弱能力增强。

(2)巨菌草留茬沙障可以有效阻止地表沙物质的侵蚀和搬运,与风速降低情况相似,随沙障行带的增多,地表风沙运动趋于稳定。

(3)兼顾防风固沙效益和经济效益的巨菌草留茬沙障设置模式是:行距2 m,高30 cm,带宽为18 m。该模式的巨菌草沙障有着最佳的性价比,宜在干旱地区推广。

参考文献(References):

〔1〕 王睿,周立华,陈勇,等.库布齐沙漠机械防沙措施的防护效益〔J〕.干旱区研究,2017,34(2):330-336.〔Wang Rui,Zhou Lihua,Chen Yong,et al. Wind-blown sand control effect of sand barriers used in the Hobq Desert〔J〕. Arid Zone Research,2017,34(2):330-336.〕

〔2〕 朴起亨.几种不同材料机械沙障防风效应研究〔D〕.北京:北京林业大学,2010.〔Piao Qiheng. Effects of Different Sand Barriers on Wind-Break and Sand Fixation〔D〕. Beijing:Beijing Forestry University,2010.〕

〔3〕 马瑞,刘虎俊,马彦军.沙源供给条件对机械沙障固沙作用的影响〔J〕.水土保持学报,2013,27(5):105-109.〔Ma Rui,Liu Hujun,Ma Yanjun. Influences of sand fountain on sand-fixation of mechanical sand barriers〔J〕. Journal of Soil and Water Conservation,2013,27(5):105-109.〕

〔4〕 高永.沙柳沙障〔M〕.北京:科学出版社,2013:36-65.〔Gao Yong. Salix Sand Barrier〔M〕. Beijing:Science Press,2013:36-65.〕

〔5〕 赵国平,左合君,徐连秀,等.沙柳沙障防风阻沙效益的研究〔J〕.水土保持学报,2008,22(2):38-41.〔Zhao Guoping,Zuo Hejun,Xu Lianxiu,et al. Effect of salix deserts barrier on reducing wind and stabilizing sand〔J〕. Journal of Soil and Water Conservation,2008,22(2):38-41.〕

〔6〕 王学全,卢琦,杨恒华,等.高寒沙区沙障固沙效益与生态功能观测研究〔J〕.水土保持学报,2009,23(3):38-41.〔Wang Xuequan,Lu Qi,Yang Henghua,et al. Field measurements of sand-barrier benefits and ecological functions in sandy lands of Qinghai-tibet plateau〔J〕. Journal of Soil and Water Conservation,2009,23(3):38-41.〕

〔7〕 屈建军,喻文波,秦晓波.HDEP功能性固沙障防风效应试验〔J〕.中国沙漠,2014,34(5):1 185-1 193.〔Qu Jianjun,Yu Wenbo,Qin Xiaobo. Wind-protecting efficiency of HDPE functional sand-fixing barriers〔J〕. Journal of Desert Research,2014,34(5):1 185-1 193.〕

〔8〕 马全林,王继和,詹科杰,等.塑料方格沙障的固沙原理及其推广应用前景〔J〕.水土保持学报,2005,19(1):36-40.〔Ma Quanlin,Wang Jihe,Zhan Kejie,et al. Study on fixing sand principals of plastic checkerboard sand-barrier and its potential application〔J〕. Journal of Soil and Water Conservation,2005,19(1):36-40.〕

〔9〕 贾丽娜,丁国栋,吴斌,等.几种不同材料类型带状沙障防风阻沙效益对比研究〔J〕.水土保持学报,2010,24(1):41-44.〔Jia Lina,Ding Guodong,Wu Bin,et al. Effect of different material types of sand barrier on wind prevention and sand resistance〔J〕. Journal of Soil and Water Conservation,2010,24(1):41-44.〕

〔10〕林兴生,林占熺,林冬梅,等.荒坡地种植巨菌草对土壤微生物群落功能多样性及土壤肥力的影响〔J〕.生态学报,2014,34(15):4 304－4 312.〔Lin Xingsheng,Lin Zhanxi,Lin Dongmei,et al. Effects of planting *Pennisetum* sp. on soil microbial functional diversity and fertility in the barren hillside〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2014,34(15):4 304－4 312.〕

〔11〕谢长海,王培丹,刘艳玲,等.巨菌草对干旱胁迫的生理响应及相关性分析〔J〕.北方园艺,2015(2):129－133.〔Xie Changhai,Wang Peidan,Liu Yanling,et al. Correlation analysis and physiological characteristics of *Pennisetum* sp. under drought stress〔J〕. Northern Horticulture,2015(2):129－133.〕

〔12〕林兴生,林占熺,林冬梅,等.低温胁迫5种菌草的抗寒性评价〔J〕.草业学报,2013,22(2):227－234.〔Lin Xingsheng,Lin Zhanxi,Lin Dongmei,et al. Cold-tolerance of 5 species of Juncao under low temperature stress〔J〕. Acta Prataculture Sinica,2013,22(2):227－234.〕

〔13〕丁铭,白璐,王龙清.巨菌草引进试验及栽培种植技术〔J〕.农村科技,2013(12):60－61.〔Ding Ming,Bai Lu,Wang Longqing. The introduction and cultivation test Jujun grass planting technology〔J〕. Rural Science and Technology,2013(12):60－61.〕

〔14〕陈新闯,董智,李锦荣,等.乌兰布和沙漠不同下垫面冬季沙尘通量〔J〕.中国沙漠,2016,36(6):1 527－1 532.〔Chen Xinchuang,Dong Zhi,Li Jinrong,et al. Winter sand-dust flux over different underlying surfaces in the Ulan Buh desert〔J〕. Journal of Desert Research,2016,36(6):1 527－1 532.〕

〔15〕徐含青.利用EXCEL进行线性拟合的应用〔J〕.上海计量测试,2013,40(2):55－56,58.〔Xu Hanqing. Application of EXCEL to linear fitting〔J〕. Measurement Test in Shanghai,2013,40(2):55－56,58.〕

〔16〕冯瑞.沙区农田保护性措施防蚀机理的风洞模拟实验研究〔D〕.杨凌:西北农林科技大学,2007.〔Feng Rui. The Wind Tunnel Simulation Research on the Protective Measures of Farmland in Desert-Region〔D〕. Yangling:Northwest Agriculture and Forestry University,2007.〕

〔17〕刘目兴,刘连友.农田休闲期作物留茬对近地表风场的影响〔J〕.农业工程学报,2009,25(9):295－300.〔Liu Muxing,Liu Lianyou. Effect of crop stubble on wind field above field surface during fallow period of cropland〔J〕. Transactions of the CSAE,2009,25(9):295－300.〕

〔18〕董立江.带状留茬间作农田防风效应的原位测试研究〔D〕.呼和浩特:内蒙古农业大学,2009.〔Dong Lijiang. In-situ Testing Study on Wind-protecting Effect of Intercropping Stripes Stubble Cropland〔D〕. Hohhot:Inner Mongolia Agricultural University,2009.〕

〔19〕康向光,李生宇,马学喜,等.两条尼龙阻沙网不同组合间距的积沙量对比分析〔J〕.干旱区研究,2015,32(2):347－353.〔Kang Xiangguang,Li Shengyu,Ma Xuexi,et al. Sand masses blocked by double nylon mesh sand barriers with different intervals〔J〕. Arid Zone Research,2015,32(2):347－353.〕

〔20〕杨文斌,丁国栋,王晶莹,等.行带式柠条固沙林防风效果〔J〕.生态学报,2006,26(12):4 106－4 112.〔Yang Wenbin,Ding Guodong,Wang Jingying,et al. Windbreak effects of belt scheme *Caragana korshinskili* kom. plantation for sand-fixation〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2006,26(12):4 106－4 112.〕

〔21〕杨文斌,卢琦,吴波,等.低覆盖度不同配置灌丛内风流结构与防风效果的风洞实验〔J〕.中国沙漠,2007,27(5):791－796.〔Yang Wenbin,Lu Qi,Wu Bo,et al. Wind tunnel experiment on wind flow structure and windbreak effect within low-covered shrubs under different arrangements〔J〕. Journal of Desert Research,2007,27(5):791－796.〕

〔22〕李锦荣,蒙仲举,高永,等.低立式格状土工沙障固沙效果研究〔J〕.内蒙古农业大学学报,2009,30(1):81－86.〔Li Jinrong,Meng Zhongju,Gao Yong,et al. Effect of upright geotextile checkerboard stabilizing sand〔J〕. Journal of Inner Mongolia Agricultural University,2009,30(1):81－86.〕

〔23〕李谦.PLA沙障防风固沙效益的变化过程〔D〕.呼和浩特:内蒙古农业大学,2012.〔Li Qian. The Change Process of Windbreak and Sand-fixing Benefits on PLA Barrier〔D〕. Hohhot:Inner Mongolia Agricultural University,2012.〕

〔24〕袁立敏.PLA沙障对土壤物理性质影响及其防护效益研究〔D〕.呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.〔Yuan Limin. Study on Effects of Soil Physical Properties and Protection Benefits by PLA Sand Barrier〔D〕. Hohhot:Inner Mongolia Agricultural University,2012.〕

〔25〕杨阳.库布其沙漠灌溉农田沙害防治体系效益分析〔D〕.呼和浩特:内蒙古农业大学,2017.〔Yang Yang. Analysis in Benefit System of Sand Hazared Control of Kubuqi Desert Irrigated Farmland〔D〕. Hohhot:Inner Mongolia Agricultural University,2017.〕

〔26〕袁鑫鑫,王海峰,雷加强,等.不同结构尼龙网防风效应的风洞模拟〔J〕.干旱区研究,2017,34(1):185－190.〔Yuan Xinxin,Wang Haifeng,Lei Jiaqiang,et al. Wind tunnel simulation of wind protection effects of nylon nets with different structures〔J〕. Arid Zone Research,2017,34(1):185－190.〕

〔27〕黄富祥,高琼.毛乌素沙地不同防风材料降旷野风速效应比较〔J〕.水土保持学报,2001,15(3):27－37.〔Huang Fuxiang,Gao Qiong. Comparison of wind velocity reduced by seven different windproof materials in Maowusu sandland〔J〕. Journal of Soil and Water Conservation,2001,15(3):27－37.〕

〔28〕吴正.风沙地貌与治沙工程学〔M〕.北京:科学出版社,2003:61－69.〔Wu Zheng. Geomorphology of Wind-drift Sands and Their Controlled Enginnering〔M〕. Beijing:Science Press,2003:61－69.〕

Windbreak and Sand-fixation Efficiency and Suitable Modes of *Pennisetum giganteum* Sand Barrier

WANG Qiang, ZUO He-jun, LI Gang-tie, GUO Jing-yu, WEI Xiang-hong,
LIU Yu-sheng, YAN Min
(*College of Desert Control Science and Engineering/Inner Mongolia Key Laboratory of Aeolian Physics and Desertification Control Engineering*, *Inner Mongolia Agricultural University*, *Hohhot* 010011, *Inner Mongolia*, *China*)

Abstract: This research aimed at the windbreak and sand-fixation efficiency of *Pennisetum giganteum* sand barriers with different stubble height (10 cm and 30 cm) at Liuguaishatou along the riparian zone of the Yellow River in the Ulanbuh Desert. The sand barriers were set by *P. giganteum* with 1 or 2 m row spacing and 10 – 15 cm plant distance. The results showed that: ① The windbreak and sand-fixation efficiency was closely related to the height and row spacing of *P. giganteum* sand barriers. For a certain height level, the more the rows and the smaller the plant distance were, the better the windbreak and sand-fixation efficiency would be, but the required materials would be increased; ② The sediment discharge in the *P. giganteum* sand barrier was mainly concentrated within a 15 cm height from the ground, and the capability of preventing wind-blown sand was strong below 5 cm. When the row spacing of sand-barrier was 1 or 2 m, the wind speed was reduced below the sand-removing one after wind blew over 9 or 12 sand barriers; ③ A high efficiency and low cost should be ensured in setting sand barrier. It is considered that the *P. giganteum* sand barrier with 30 cm height and 2 m row spacing is suitable in arid area.

Key words: *Pennisetum giganteum*; sand barrier; windbreak efficiency; sediment; Ulanbuh Desert